Der Einfluß der individuellen Faktoren bei der Wurzelbehandlung mit Hochfrequenzstrom

---

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung der zahnärztlichen Doktorwürde
der medizinischen Fakultät an der
Friedrich Wilhelms-Universität zu Berlin

---

vorgelegt von

Johannes Hirchert
Zahnarzt aus Mirow

Tag der Promotion: 20. 4. 1932

04

Gedruckt mit Genehmigung
der
medizinischen Fakultät der Friedrich-Wilhelms-Universität Berlin

---

Dekan: Prof. Dr. v. Bergmann
Referent: Privatdozent Dr. Fr. Münzesheimer
Korreferent: Professor Dr. Hermann Schröder

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

Die Anwendung des Hochfrequenzstromes bei der Zahnwurzelbehandlung hat in den letzten Jahren weitgehende Beachtung und allgemeines Interesse gefunden. Nachdem als erster wohl Sturm die Aufmerksamkeit der Zahnärzte auf diese Anwendungsmöglichkeit der sogenannten „Diathermie" gelenkt hatte, sind in den Fachzeitschriften eine ganze Reihe von Veröffentlichungen erschienen, die zu dem Thema Stellung nehmen (Feiler, Ebbers, E. u. W. Flohr, Wasgien u. a.). Ein Ueberblick über diese Arbeiten ergibt, daß von einer — man kann wohl sagen: ungewöhnlich großen Anzahl günstiger Behandlungsergebnisse berichtet wird, andererseits fehlen aber auch nicht kritische Stimmen sowie Mitteilungen über Mißerfolge mit mehr oder weniger schweren Folgen. Auch über die Art der Anwendung herrscht vielfach noch geteilte Meinung.

Um ein Verfahren im Rahmen des irgend Möglichen zu beherrschen, seine Schwächen kompensieren, Fehler bei der Anwendung vermeiden zu können, ist es — abgesehen von der selbstverständlichen Voraussetzung der Kenntnis seiner prinzipiellen Grundlagen — nötig, sich Klarheit zu verschaffen über die Einzelheiten seiner Wirkungsweise während der Anwendung, wie sie bedingt sind, außer durch die Gegebenheiten des Verfahrens selbst, etwa durch die vorliegenden strukturellen und anatomischen Verhältnisse des behandelten Gebietes.

Wie sich diese individuellen Faktoren bei der Zahnwurzelbehandlung mittels Hochfrequenzstrom im einzelnen auswirken, soll nachstehend näher untersucht werden.

Bekanntlich beruht die spezifische Wirkung und damit die therapeutische Verwendbarkeit des Hochfrequenzstromes (vergl. die Arbeiten von Tesla, d'Arsonval, v. Zeyneck, v. Berndt, Nagelschmidt, Doyen) einerseits auf der allen Stromarten — auch Gleichstrom und niederfrequentem Wechselstrom — eigentümlichen Umwandlung von elektrischer in

thermische Energie (Joulesche Wärme) innerhalb des stromdurchflossenen Leiters, andererseits aber — und das im Gegensatz zu den übrigen Stromarten — auf dem Fehlen jeglicher Reizerscheinungen (elektrolytischer und faradischer Wirkungen) im durchströmten animalischen Gewebe. Dies wird dadurch erreicht, daß die Frequenz des Wechselstromes derartig gesteigert wird, daß infolge des schnellen Wechsels der Stromrichtung elektrolytische und damit faradische Wirkungen nicht mehr auftreten können. Andererseits führt jedoch auch eine zu hohe Frequenzsteigerung ebenfalls zu Schwierigkeiten in der Anwendung, so daß sich als praktisch am brauchbarsten Frequenzwerte in der Größenordnung von etwa 500 000/sec (500 Kilohertz) erwiesen haben.

Es ist also, um es kurz zusammen zu fassen, charakteristisch für den Hochfrequenzstrom, daß unter Ausschaltung aller unerwünschten Nebenerscheinungen eine reine Wärmewirkung erzielt wird[1], wobei hervorzuheben ist, daß diese Erwärmung nicht, wie bei äußerlicher Wärmeapplikation, langsam ins Innere vordringt, sondern im gesamten stromdurchflossenen Gewebe entsteht, daß es sich also um eine ausgesprochene Tiefendurchwärmung („Thermopenetration", „Diathermie") handelt, die die Möglichkeit bietet, ihre Wirksamkeit auch an Stellen entfalten zu lassen, die sonst einer Wärmebehandlung unzugänglich sind.

In der Allgemeinmedizin wird unterschieden zwischen zwei Anwendungsarten des Hochfrequenzstromes, der sogenannten medizinischen und der chirurgischen Diathermie[2], die zunächst kurz betrachtet werden sollen.

---

1. Es sei hier abgesehen von Wirkungen, die in diesem Zusammenhange weniger interessieren, wie Molekularoszillationen etc. (vgl. Nagelschmidt, Lehrbuch der Diathermie).

2. Da in der zahnärztlichen Fachliteratur diese Begriffe nicht einheitlich angewandt werden, sei für diese Arbeit die Grenze folgendermaßen gezogen: Medizinische Diathermieströme erwärmen das Gewebe, ohne die Zellen irreversibel zu schädigen, chirurgische Diathermieströme schädigen die Zellen irreversibel (Koagulation, Verkochung, Verbrennung). Zu letzteren sind auch die Hochfrequenzströme zu rechnen, die in der Wurzelbehandlung Anwendung finden. Es erscheint zweckmäßig, sie als Hochfrequenzströme zu bezeichnen u. von der hier wenig angebrachten Bezeichnung Diathermie abzusehen.

Bei der „medizinischen Diathermie“ wird der Strom zwischen zwei annähernd gleich großen, möglichst parallel angelegten flächenhaften Elektroden übergeleitet. Das gesamte durchströmte Gebiet wird annähernd gleichmäßig erwärmt, und es kommt hier zu einer langanhaltenden Hyperämie.

Bei der „chirurgischen Diathermie“ ist nur eine — die sogenannten inaktive — Elektrode flächenhaft, die andere — aktive — dagegen nadel- oder lanzettförmig ausgebildet. Da ähnliche Verhältnisse für die Wurzelbehandlung vorliegen, soll der Weg, den der elektrische Strom unter diesen Bedingungen nimmt, sowie seine Wirkung genauer betrachtet werden.

Von der schmiegsamen, dem Körper fest anliegenden flächenhaften inaktiven Elektrode aus (willkürlich herausgegriffene Stromrichtung) geht der Strom in den Körper über. Er findet hier zunächst einen infolge seines großen Querschnittes verhältnismäßig guten Leiter, das Körpergewebe in gesamter Ausdehnung vor. In diesem Gebiete verteilt sich der Strom unter Ausnutzung sämtlicher sich ihm bietenden Wege, um sich in der Nähe der aktiven Elektrode fast punktförmig zusammenzudrängen und dann in diese überzugehen. Die Gesamtheit der Stromlinien hat also — ganz grob schematisch — eine etwa kegelförmige Gestalt.

Aus dem Joule schen Gesetz

$$Q = J^2 . R . t^3$$

ergibt sich, da J an der Basis und der Spitze des Kegels natürlich gleich groß, R dagegen an der Basis sehr klein, an der Spitze sehr groß ist, daß eine wesentliche Erwärmung nur in der Nähe der aktiven Elektrode, also dort, wo sich die Stromlinien zusammendrängen, entsteht. Die Elektrode selbst bleibt dabei jedoch verhältnismäßig kalt (Kaltkauter), weil sie selbst dem Strom wenig Widerstand bietet und außerdem die in ihrer Nähe entstehende Wärme gut abgeleitet. Die in nächster Umgebung der aktiven Elektrode entstehende Wärme ist bei genügender Stromstärke so groß und dabei so scharf abgegrenzt, daß sie zum schnittartigen Durchtrennen von Gewebe benutzt werden kann.

Abgesehen von der heute allgemein üblichen Ausbildung der inaktiven Elektrode als Sitzkissen mit kapazitativer Ueberleitung

---

3. Zusammenstellung der im Text angewandten Zeichen: S. 31).

des Stromes in den Körper wird eine ganz ähnliche Anordnung nun auch bei der Anwendung des Hochfrequenzstromes für die Zahnwurzelbehandlung benutzt. Dadurch jedoch, daß die aktive Elektrode in den Wurzelkanal eingeführt wird, der Stromweg also hier zunächst von dem schlecht leitenden Hartgebilde des Zahnes umgeben ist, ergibt sich eine mehr oder weniger starke Zusammendrängung der Stromlinien und damit eine entsprechende Erwärmung innerhalb des gesamten Wurzelkanales, nicht nur in unmittelbarer Nähe der Elektrode.

Diese Erwärmung des Kanalinhaltes bildet die Grundlage für die Anwendung des Hochfrequenzstromes bei der Zahnwurzelbehandlung, wobei folgende Anforderungen an das Verfahren zu stellen sind:

1. Das gesunde Gewebe außerhalb des Zahnes, speziell das eigentliche periodontale Gewebe, darf durch Wärmewirkung des Stromes nicht geschädigt werden.
2. Die Wärmewirkung des Stromes innerhalb des Kanalsystems des Zahnes dagegen soll so groß sein, daß dessen Inhalt — evtl. unter Mitwirkung desinfizierender Substanzen — sterilisiert, oder wenigstens hochgradig desinfiziert wird, besonders in seinen sonst unzugänglichen Teilen.

Um beiden Forderungen gerecht werden zu können, muß also eine Möglichkeit bestehen, den Strom richtig zu dosieren, so daß keine Ueberhitzung des periodontalen Gewebes, andererseits aber auch eine zur Desinfektion genügende Erwärmung des Kanalinhaltes erzielt wird.

Es ergibt sich nun die Frage, wann von einer optimalen Wirkung des Hochfrequenzstromes gesprochen werden kann. Das erstrebenswerte Ziel ist natürlich immer, wenn nicht bewußt einmal eine andere Wirkung erreicht werden soll, eine möglichst hohe, möglichst gleichmäßige Erwärmung des Kanalinneren, bei möglichst geringer Temperatursteigerung außerhalb des Zahnes. Ist eine gleichmäßige Erwärmung des gesamten Kanalsystems bei gleichzeitiger Schonung des periodontalen Gewebes aus irgendwelchen Gründen nicht oder nur schwer erreichbar, so ist wenigstens eine ausgiebige Erhitzung der engen, sonst nicht zugänglichen Kanalteile anzustreben. Die Grenze der Stromzufuhr bildet stets die Erreichung der zulässi-

gen Erwärmung des periodontalen Gewebes. Dieser Grenze erst dann nahe zu kommen, wenn der Kanalinhalt bereits eine hohe Temperatur erreicht hat, wird das Bestreben sein müssen.

Um ein genaues Bild zu erhalten, sollen die Faktoren, die die Vorgänge bei der Wurzelbehandlung mit Hochfrequenzstrom in irgendeiner Richtung beeinflussen, einzeln besprochen werden.

Das Joulesche Gesetz in der angeführten Form ist wohl ausreichend, um die beim Stromdurchgang in einem Leiter erzielte Wärmemenge zu bestimmen. Das genügt jedoch nicht, denn die gleiche Wärmemenge ruft z. B. in einem Leiter von geringem Volumen eine größere Temperatursteigerung hervor, als in einem solchen von großem Volumen. Es muß also noch zur Erfassung der in Frage stehenden Temperatursteigerung die Wärmekapazität des Leiters (die bei gleicher spezifischer Wärme proportional dem Volumen ist) berücksichtigt werden, so daß sich die Formel ergibt:

$$Qve = \frac{J^2 \cdot R \cdot t}{V}$$

Das heißt also, daß die pro Volumeneinheit erzeugte Wärmemenge (= Temperaturerhöhung) — wenn von sonstigen Komplikationen, auf die später noch eingegangen werden soll, abgesehen wird, — außer von J und t, die beliebig regulierbar sind, grundsätzlich abhängig ist von zwei fundamentalen Faktoren, die im vorliegenden Fall von dem anatomischen Bau des Zahnes bedingt sind, nämlich von dem Widerstand und dem Volumen des Leiterstückes.

Vor der Besprechung der tatsächlichen, oft sehr komplizierten Verhältnisse am Zahn, soll zur Orientierung die Stromwirkung unter vereinfachten, „idealen“ Verhältnissen kurz betrachtet werden.

Unter der Voraussetzung also, daß zylindrische[4] Leiter von gleichem spezifischen Widerstand die gleiche Zeit hindurch

4. entsprechend natürlich alle Leiter, die in ihrer ganzen Länge gleichbleibenden Querschnitt aufweisen. Im folgenden soll der Einfachheit halber immer nur von zylindrischen Leitern gesprochen werden.

vom elektrischen Strom durchflossen werden, lassen sich unter Benutzung der bekannten oder bereits angeführten Formeln

$$Q = J^2 \cdot R \text{ und } Qve = \frac{J^2 \cdot R}{V}$$

$$R = \frac{1}{q}$$

$$J = \frac{E}{R}$$

ohne Schwierigkeiten die Fundamentalformeln für die Entstehung der Jouleschen Wärme ableiten, von denen nachstehend die hier besonders interessierenden Sätze zusammengestellt seien:

A. Bei Anwendung gleicher Stromstärke ist:
   1. die entstehende Wärmemenge $Q = R$
   2. die Temperatursteigerung $Qve = \frac{R}{V}$ oder
   3. die Temperatursteigerung $Qve = \frac{1}{q^2} = \frac{1}{d^4}$

B. Bei Anwendung gleicher Spannung ist
   1. die entstehende Wärmemenge $Q = \frac{1}{R}$
   2. die Temperatursteigerung $Qve = \frac{1}{R \cdot V}$ oder
   3. die Temperatursteigerung $Qve = l^2$

C. Zur Erzielung gleicher Erwärmung ist
   1. die anzuwendende Stromstärke $J = \sqrt{\frac{V}{R}}$ oder
   2. die anzuwendende Stromstärke $J = q$
   3. die anzulegende Spannung $E = \sqrt{R \cdot V}$ oder
   4. die anzulegende Spannung $E = l$
   5. die aufzuwendende Energie (Watt) $E. J = V$, also proportional dem Volumen.

Aus diesen Sätzen erhellt, daß zur Berechnung der entstehenden Wärmemenge (Q) die Messung des Widerstandes allein genügen würde (Satz A1 u. B1). Da es jedoch zur Erzielung einer bestimmten Temperatursteigerung darauf ankommt, auf welches Volumen sich diese erzeugte Wärmemenge verteilt, ist auch die Messung dieses Volumens erforderlich.

Aus der Verbindung des Satzes C. 5: $E. J = V$ und des Ohmschen Gesetzes $\frac{E}{J} = R$ ergibt sich, — immer unter der Voraussetzung gleicher Zeitdauer des Stromflusses — daß zur Erzielung einer bestimmten Temperatursteigerung Stromstärke und

-spannung nicht beliebig gewählt werden dürfen, sondern durch die gegebenen Werte R und V eindeutig bestimmt sind, nämlich

$$J = \sqrt{\frac{V}{R}} \quad \text{(Satz C1)}$$

$$E = \sqrt{R \cdot V} \text{ (Satz C3).}$$

Vorstehende Sätze sind für zylindrische Leiter abgeleitet worden. Nun sind ja aber die Verhältnisse am Zahn wesentlich komplizierter, und es fragt sich, wieweit sie hier noch Anwendung finden können. Dazu ist zu sagen, daß die Sätze A1, A2, B1, B2, C1, C3, C5 auch Allgemeingültigkeit haben, daß sich ferner auch kompliziertere Formen durch Unterteilung in kleinere Leiterabschnitte angenähert zylindrischer Form überblicken lassen. So kann man sich z. B. einen kegelförmigen Leiter aus einer Reihe zylinderförmiger Leiter mit jeweils größerem Radius zusammengesetzt denken.

Der Verfasser hat nun eine Reihe von ein und mehrwurzeligen Zähnen einer Untersuchung unterzogen mit dem Ziel, Aufschluß zu erhalten über die Variationen, die sich hinsichtlich Widerstand und Volumen bezw. der den Widerstand bedingenden Formgestaltung ihrer leitenden Teile ergeben, um daraus gewisse Schlüsse hinsichtlich der anzuwendenden Stromstärken ziehen zu können.

Es sei vorausgeschickt, daß die Resultate solcher Widerstandsmessungen natürlich wesentlich beeinflußt werden durch den spezifischen Widerstand des Kanalinhaltes. Auch bei Behandlung in vivo werden da große Unterschiede vorhanden sein, je nachdem der Strom durch lebendes Pulpagewebe, durch gangränöse Massen oder durch mehr oder weniger konzentrierte Desinfektionslösungen fließt. Da es hier nur auf Vergleichswerte auf Grund der Volumeneigenschaften ankam, war nur möglichste Gleichheit des Elektrolyten erforderlich. Zu dem Zweck wurden frisch extrahierte Zähne soweit exkaviert, daß die Kanaleingänge freilagen, ferner soweit wie möglich von den an den Wurzeln zurückgebliebenen Periostresten befreit und sodann mit einer Vorratslösung von $1^0/_{00}$ Sublimat übergossen, da sich gezeigt hatte, daß so behandelte Zähne nach achttägiger Lagerung in dieser Lösung annähernd dieselben Werte ergaben, wie frisch extrahierte.

Natürlich handelt es sich, infolge der unvermeidlich mit hineingebrachten organischen Stoffe, nicht um einwandfrei bestimmbare Elektrolyten im physikalischen Sinne, doch zeigten wiederholte Nachmessungen immer ein genügend gleichbleibendes Ergebnis von ρ = ca. 20 . 10^5. (Berliner Leitungswasser[5], das ungefähr der Ringerlösung entspricht, bei 30^0 ρ = 38,10^6, bei 50^0 ρ = 28,5 . 10^6 und Hundeblut[6] ρ = 36,9 . 10^4.

Es wurde folgende Versuchsanordnung gewählt: Ein 4-Volt-Primärkreis wurde durch einen von ca. 200—800 Perioden regulierbaren Summer unterbrochen. Daran war transformatorisch ein Sekundärkreis gekoppelt, der in bekannter Schaltung eine Wheatstonesche Meßbrücke mit Telefonhörer enthielt.

Unterschiede bei Frequenzen von 200—800/sec zeigten sich nicht, die Messungen wurden bei ca. 300/sec Unterbrechungen ausgeführt, da dieser Ton gut hörbar war, andererseits kapazitative Ableitung, die bei höheren Frequenzen auftritt, möglichst vermieden werden sollte. Nachmessungen mit 20 Volt Gleichstrom und einem Instrument, das 1/10 mA abzulesen gestattete, zeigten übrigens angenähert dieselben Werte, so daß es sich bei den gefundenen Meßergebnissen tatsächlich um den reinen Leitungswiderstand handelt.

Als a k t i v e Elektrode diente eine blankgeschabte Millernadel, die bis auf eine etwa 2 mm freie Spitze mit einem isolierenden Lack überzogen war. Als zweite Elektrode war ein Nickelindraht in größerer Länge in die vorerwähnte Untersuchungsflüssigkeit getaucht. Der Uebergangswiderstand zwischen beiden Elektroden und Flüssigkeit wurde jedesmal vor und nach den Versuchen gemessen (ca. 1800 Ohm) und von den gefundenen Werten abgesetzt.

Die Zähne wurden dann jedesmal zu Beginn der Messungen abgespült und in frischer Flüssigkeit mehrfach evakuiert, um etwaige störende Luftblasen im Kanalinnern zu entfernen, sodann außen und am Kronenteil bis zum Kanaleingang getrocknet. Dann wurde jeder Zahn am Kronenteil isoliert eingespannt, die aktive

---

5. Deutscher Kalender für Elektrotechniker, 1925/6.

6. Handwörterbuch der Naturwirtschaften, Verlag Gustav Fischer, Jena, 1912.

Elektrode mit ihrem blanken Teil in die Flüssigkeit des Kanaleinganges getaucht und eine Schale mit derselben Flüssigkeit, in die die inaktive Elektrode tauchte, von unten her an die Zahnwurzelspitze herangebracht. Es wurden stets mindestens zwei Messungen ausgeführt, einmal wurde nur die Wurzelspitze etwa 1 mm tief eingetaucht, das zweite Mal wurde der Zahn so tief in die Flüssigkeit versenkt, wie er in vivo etwa vom Gewebe umgeben war. Bisweilen wurden auch noch Zwischenmessungen vorgenommen.

Bei mehrwurzeligen Zähnen wurden zunächst dieselben Messungen durchgeführt, ferner auch nach Möglichkeit die Widerstände der einzelnen Kanäle bestimmt; dazu wurden entweder die einzelnen Wurzeln nur mit der Spitze eingetaucht und gemessen, oder aber der ganze Zahn wurde bis zur physiologischen Grenze eingetaucht und dann jeder Kanalwiderstand einzeln gemessen. Es waren hierbei natürlich die Kanaleingänge in der Pulpahöhle voneinander zu isolieren, was sich bisweilen als sehr schwer möglich herausstellte.

Die Zusammenstellung und Besprechung der gefundenen Werte erfolgt später.

Nach Durchführung dieser Messungen kam es darauf an, über Volumen und Formgestaltung der leitenden Teile dieser Zähne Aufschluß zu erhalten, einerseits was die Grundform des verhältnismäßig weiten Hauptabschnittes anbelangt, andererseits besonders im Hinblick auf etwaige Deltabildungen am Apex, sowie sonstige feine Verzweigungen des Kanalsystems. Nach verschiedenen Vorversuchen wurden die Zähne mit einer konzentrierten Lösung des sehr leicht wasserlöslichen Uranchlorids gefüllt, indem sie — völlig von Flüssigkeit überdeckt — einer mehrfachen Evakuation unterzogen wurden. Sie mußten dann von außen sehr sorgfältig gereinigt werden, und auf der Schwierigkeit dieser Reinigung, die bisweilen bei Zähnen mit mehreren, teilweise miteinander verwachsenen Wurzeln besteht, beruhen einige störende Röntgenschatten bei den Aufnahmen. Doch kann man selbst sehr feine Verzweigungen bei dieser Methode noch sehr gut erkennen. Von den Zähnen wurden dann je zwei Röntgenaufnahmen — auf der Reproduktion nebeneinander liegend — hergestellt, wobei sie in ihrer Längsachse um 90^0 gedreht wurden,

so daß man die Kanäle jeweils von zwei Seiten sieht. Zur Berechnung des Volumens kann das natürlich, selbst bei unkomplizierter Form, nicht dienen. Wollte man beispielsweise ein Lineal nach derartigen Photographien berechnen, so bekäme man den richtigen Wert nur, wenn man die Kamera einmal genau in der Blattrichtung, das andere Mal senkrecht auf die Fläche einstellte. Bei Aufnahmen 45° von links und rechts würde ein viel zu großer Wert resultieren. Es wurde versucht, diesen Fehler jedenfalls bei den einwurzeligen Zähnen nach Möglichkeit auszuschalten, indem der Strahl einmal auf die flache, einmal auf die breite Seite gerichtet wurde. Die mehrwurzeligen Zähne dagegen wurden so aufgelegt, daß sich die einzelnen Kanäle möglichst wenig verdeckten. Die Nummern auf den Röntgenaufnahmen decken sich mit denen der nun folgenden Zusammenstellung der gemessenen Widerstandswerte.

Die hierin angewandten Zeichen bedeuten:

S = Spitze in Flüssigkeit getaucht.

T = Tief in Flüssigkeit getaucht, (etwa so weit, wie der Zahn in vivo von Gewebe umfaßt wird).

a, b, c = Indices für die einzelnen Kanäle (im allgemeinen a = der größte Kanal).

1, 2, 3 = Indices für die einzelnen Wurzeln. (Zahlen vor S oder T geben die Anzahl der gleichzeitig eingetauchten Spitzen oder Wurzeln an).

Z. B.: Sa = nur Spitze eingetaucht, Kanal a gemessen.
T b = tief eingetaucht, Kanal b gemessen.
S 2 u. 3 = Spitzen der Wurzel 2 u. 3 gemeinsam eingetaucht.
3 T = 3 Wurzeln tief eingetaucht, gemeinsam gemessen.

Prozentzahl hinter T gibt das Verhältnis $\frac{T}{S}$ an.

Zusammenstellung der gemessenen Widerstandswerte.

1.	S	26 900	
	T	13 200	49 %
2.	S	36 200	
	T	14 900	41 %

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51

3.	S	23 400	
	T	14 700	63 %
4.	S	50 000	
	T	32 100	64 %
5.	S	13 300	
	T	8 700	65 %
6.	S	248 000	
	2,5 mm	248 000	
	5 mm	224 000	
	7,5 mm	159 000	
	10 mm	86 500	
	12,5 mm	60 500	
	15 mm	43 000	
	T	28 200	11 %
7.	S	26 700	
	T	13 900	52 %
8.	S	22 300	
	2 mm	20800	
	4 mm	19 000	
	6 mm	16 800	
	8 mm	14 100	
	10 mm	12 400	
	12 mm T	11 200	50 %
	ziemlich regelmäßiger Abfall.		
9.	S	173 000	
	7 mm	98 000	
	10 mm	76 800	
	T	40 500	23 %
	Kanaleingang sehr eng, mit feinster Nadel nicht zu sondieren; Karies unterhalb Schmelzzementgrenze.		
10.	S	18 600	
	7 mm	15 800	
	T	11 400	61 %
11.	S	137 800	
	5 mm	53 900	
	T	21 700	16 %

12.	S	33 700	
	2 mm	33 200	
	4 mm	33 200	
	6 mm	33 200	
	8 mm	26 800	
	10 mm	20 300	
	T	14 600	43 %
13.	S	59 900	
	T	24 300	41 %
14.	S	120 000	
	2 mm	119 500	
	4 mm	118 000	
	6 mm	81 500	
	8 mm	51 000	
	T	34 00	28 %
15.	S	123 000	
	T	13 500	11 %
16.	S	34 000	
	T	23 500	69 %
17.	S	55 500	
	T	19 500	35 %
18.	S	30 500	
	4 mm	25 500	
	8 mm	18 500	
	T	11 000	36 %
19.	S	91 000	
	T	40 500	44 %
20.	Granul.	77 000	mit Granulom
	S	77 000	
	5 mm	58 000	
	T	12 500	16 %
21.	T a	9 000	
	T b	188 000	
	2 S	12 000	
	2 T	6 200	52 %
22.	T a	20 000	

	T b	36 500	) Querverbindung
	T c	37 500	) cf. Röntgenbild
	2 S	10 400	
	2 T	6 500	63 %
23.	2 S	19 000	
	2 T	13 400	71 %
	Nur distaler Kanaleingang zu sondieren.		
24.	T a	60 000	
	T b + c	72 000	
	2 S	78 500	
	2 T	41 000	52 %
25.	T a	24 000	
	T b + c	28 500	
	2 S	24 000	
	2 T	11 900	49 %
26.	T a	15 200	
	T b	19 400	
	T c	20 200	
	2 S	12 500	
	2 T	5 300	42 %
27.	S a	25 000	
	S b	33 500	
	S c	100 000	
	T a	16 500	
	T b	22 500	
	T c	73 000	
	2 S	16 000	
	2 T	8 200	51 %
28.	T a	26 000	
	T b	30 000	
	T c	72 500	
	2 S	21 500	
	2 T	10 500	49 %
29.	T a	10 500	
	T b	8 200	

	2 S	8 700	
	2 T	4 800	55 %
30.	S	10 000	
	6 mm	8 500	
	T	1 200	
	Perforation etwa in halber Zahnhöhe.		
31.	T a	64 500	
	T b + c	98 000	
	2 S	63 500	
	2 T	43 500	61 %
32.	2 S	15 000	
	2 T	12 500	83 %
33.	T a	22 500	
	T b	31 000	
	T c	48 000	
	3 S	19 500	
	3 T	10 200	52 %
34.	T a	16 000	
	T b	23 000	
	T c	21 500	
	3 S	11 500	
	3 T	8 300	72 %
35.	3 S	18 800	
	3 T	9 200	49 %
36.	S 1	32 000	
	S 2 + 3	40 500	
	3 S	16 700	
	3 T	12 500	75 %
37.	T a	14 900	
	T b	16 200	
	T c	17100	
	3 S	16 500	
	3 T	5 200	32 %
38.	T a	12 500	
	T b	17 500	
	T c	25 000	

	3 S	18 500	
	3 T	10 200	56 %

Kanaleingänge nur vollkommen von einander zu isolieren, evtl. auch Innenverbindungen.

39.	T a	26 000	
	T b	53 000	
	T c	92 500	
	3 S	24 000	
	3 T	20 000	83 %
40.	T a	9 200	
	T b	60 500	
	T c	50 500	
	3 S	9 100	
	3 T	5 000	55 %
41.	T a	50 000	
	T b	130 000	
	T c	400 000	
	3 S	82 000	
	3 T	41 500	51 %
42.	S 1	36 500	
	S 2 + 3	43 000	
	3 S	21 500	
	3 T	20 000	93 %
43.	S 1	105 000	
	S 2	225 000	
	S 3	460 000	
	3 S	51 000	
	3 T	23 000	45 %
44.	3 S	41 000	
	3 T	19 000	

Kariesöffnung an Schmelzzementgrenze.
3 T nicht ganz eingetaucht.

45.	3 S	18 500	
	3 T	12 500	68 %

46.	Ta	21 000	
	Tb	43 000) !	
	Tc	43 000) !	
	3 S	33 500	
	3 T	15 000	45 %
47.	T a	10 200	
	T b	92 500	
	T c	73 000	
	S	16 500	
	T	8 800	53 %
48.	S	14 300	
	T	9 100	64 %
49.	T a	28 000	
	T b	36 000	
	T c	30 000	
	S	26 000	
	T	20 000	77 %
	Feuchtigkeitsbrücke an Kanaleingängen oder Querverbindungen im Inneren.		
50.	S	51 500	
	T	24 500	48 %
51.	S	30 500	
	T	23 000	75 %

Ein Ueberblick über die vorstehenden Tabellen und Aufnahmen ergibt:

1. Die reinen Kanalwiderstandswerte (S) differieren in sehr weiten Grenzen. Einige Kanäle (sekundäre Dentinbildungen, Dentikel, Verengungen etc.) zeigen extrem hohe Widerstandswerte (vgl. Nr. 6, 9). Bei angenähert zylindrischer Form der Kanäle würden zur Erwärmung auf dieselbe Temperatur die anzuwendenden Stromstärken in demselben extremen Maße differieren, wobei die anzulegende Spannung proportional der Länge sein müßte (vgl. Satz C 2 und C 4 Seite 8).

2. Die Widerstandswerte T sind durchweg wesentlich geringer, im Mittel betragen sie ca. 52 % der Werte für S, d. h. also, daß nur etwa die Hälfte des Stromes den Weg über den Hauptkanal nimmt, während die andere Hälfte auf anderen Wegen abfließt. Aus den Röntgenbildern sind irgendwelche Beziehungen zwischen den Werten S und T nicht abzuleiten. Bei schrittweise tieferem Eintauchen zeigt sich bisweilen ziemlich regelmäßige (vgl. Nr. 8), bisweilen etwas sprunghafte (vgl. Nr. 6 u. 12) Abnahme der Werte. Gleichstromversuche zeigten dieselben Ergebnisse, so daß nicht etwa kapazitativer Nebenschluß vorliegt. Es ist anzunehmen, daß die Leitung auf dem Wege über die Tomesschen Fasern, die Zementkörperchen, die Sharpeyschen Fasern erfolgt, wobei die verschieden gute Ableitung auf diesem Wege von der mehr oder weniger ausgesprochenen sekundären Verkalkung der Dentinröhrchen abhängig ist. Eine gewisse Ableitung dürfte auch durch das Hartgebilde des Zahnes selbst erfolgen, das natürlich nicht als absoluter Isolator anzusprechen ist.

3. Bei den mehrwurzeligen Zähnen ist in fast allen Fällen der aus den Werten für die einzelnen Kanäle (T a, T b, T c) e r r e c h n e t e Gesamtwiderstand geringer als der tatsächlich g e m e s s e n e, das heißt also, daß der Strom im Inneren des Zahnes Nebenwege (Querverbindungen, Flüssigkeitsbrücken) vorgefunden hat, wodurch die Einzelwiderstandswerte zu niedrig erscheinen. So würde z. B. in Nr. 41 nach den gemessenen Einzelwerten

T a = 50 000 Ohm
T b = 130 000 Ohm
T c = 400 000 Ohm

der Gesamtwiderstand 3 T rechnerisch ca. 33 000 Ohm ergeben, tatsächlich wurden jedoch 41 500 Ohm gemessen.

4. Ein Vergleich der gefundenen Widerstandswerte mit den Röntgenbildern zeigt einen unverkennbaren Parallelismus zwischen Widerstand und Formgestaltung des Kanalsystems, so daß sich aus den Bildern gewöhnlich mühelos ein auffallend hoher, bezw. niedriger Widerstandswert erklären läßt (cf. Nr. 6; 9 und Nr. 5; 10). Nur selten liegen fast ideale Kanalformen (im Sinne der vorhergehenden Ausführungen) vor, bei denen der Widerstand fast ganz

durch den Kanalquerschnitt bestimmt ist, der in größerer Länge, auch am foramen apicale, angenähert konstant bleibt. Diese Kanäle müßten also zur Erzielung einer gleichen Temperatur mit Stromstärken beschickt werden, die den Querschnitten proportional sind, also außerordentlich stark divergieren können. Ist es aber hier schon schwer, auch nur annähernd genaue Werte anzugeben, so wird dies fast zur Unmöglichkeit in den zahlreichen Fällen, wo die Größe des Widerstandes durch häufig vorliegende plötzliche Verengungen des Kanallumens in der regio apicalis, oder auch höher (vgl. Nr. 9), durch kegelförmige oder flächenhafte (vgl. Nr. 16) Formenbildung, durch Deltabildung der Kanäle am Apex (vgl. Nr. 17, 20, 26), durch Bildung von mehr oder weniger zahlreichen, engeren und weiteren Seitenkanälchen (vgl. Nr. 19) bestimmt wird. Es ist anzunehmen, daß auch diese mannigfachen Formen des Kanalsystems zur Erzielung einer bestimmten Temperatur große Verschiedenheiten in der anzuwendenden Stromstärke bedingen. Eine Nivellierungstendenz zugunsten einer einheitlichen Stromstärke kann jedenfalls nicht gefolgert werden.

Denkt man sich sämtliche Stromwege zu einem einzigen Strang von überall kreisförmigem Querschnitt aneinandergelegt — wobei zu berücksichtigen wäre, daß auch die kürzeren Seitenäste bis zum Apex verlängert und dafür entsprechend dicker angenommen werden müßten —, so dürfte wohl in vielen Fällen ein Leiter von angenähert kegelförmiger Gestalt resultieren, wie er ja auch bei vielen einfach gestalteten Zähnen tatsächlich vorliegt. Falls die Maße dieses Kegels und sein Widerstand bekannt sind, ist es natürlich leicht, die zu seiner Erwärmung auf eine bestimmte Temperatur erforderliche Stromstärke zu berechnen, da ja für jede Volumeneinheit dieselbe Energiemenge benötigt wird. Aber hier treten schon die ersten Komplikationen auf, von denen bereits andeutungsweise die Rede war: die ungleichmäßige Erwärmung des Kanalinhaltes und die Ausbreitung der Wärme durch Wärmeleitung.

Diese Wärmeleitung, die bisher unberücksichtigt geblieben war, spielt bei der Hochfrequenzbehandlung eine bedeutende Rolle. Der durch einen kegelförmigen Leiter fließende Strom hat an jedem Leiterquerschnitt denselben Wert. Er erzeugt also an

jeder Stelle eine Erwärmung pro Volumeneinheit, die dem Quadrat des Querschnittes umgekehrt proportional ist (Satz A 3 Seite 8). Die größte Erwärmung tritt daher an der Kegelspitze auf, sie nimmt basiswärts ab, umsomehr, je stumpfer der Kegel ist.

Von der Spitze her breitet sich die Wärme durch Fortleitung basiswärts aus, beim Zahn in vivo tritt dann noch eine geringe Ableitung durch das Zahnbein, und eine sehr wesentliche durch das durchblutete periapicale Gewebe hinzu. Eine sehr ungünstige Form für gleichmäßige Durchwärmung liegt stets vor bei starker Verschiedenheit des Leiterquerschnittes, wenn also beispielsweise der sonst überall sehr weite Kanal sich plötzlich, z. B. am foramen apicale, stark verengt.

Entstehung einer gleichmäßigen Wärme im Kanalinnern wird begünstigt durch bei der Erwärmung auftretende Durchmischung (Wallen) der Flüssigkeit (sofern nicht etwa vorhandenes Eiweiß zur Gerinnung kommt), durch zylindrische oder möglichst spitze Kegelform des Kanals, durch geringes Eintauchen der aktiven Elektrode (soweit diese reicht, übernimmt sie fast die gesamte Stromleitung ohne merkliche Erwärmung) und durch Abgabe von geringer Stromstärke längere Zeit hindurch. Da in letzterem Falle natürlich auch starker Wärmeausgleich nach außen besteht, darf zur Erzielung einer ausreichenden Erwärmung des Kanalsystems eine untere Stromstärkengrenze nicht unterschritten werden.

Andererseits wird eine möglichst geringe Erwärmung des periodontalen Gewebes begünstigt durch dicke Zahnwandungen (sekundäre Zementablagerungen etc.), durch enges foramen apicale, durch Anwendung kurzer starker Stromstöße, durch gute Durchblutung des Gewebes[7]. Besonders letzterem Punkte ist eine erhebliche Bedeutung nicht abzusprechen, so daß eine unter Einwirkung gefäßverengernder Mittel stattfindende Behandlung darauf Rücksicht zu nehmen hat.

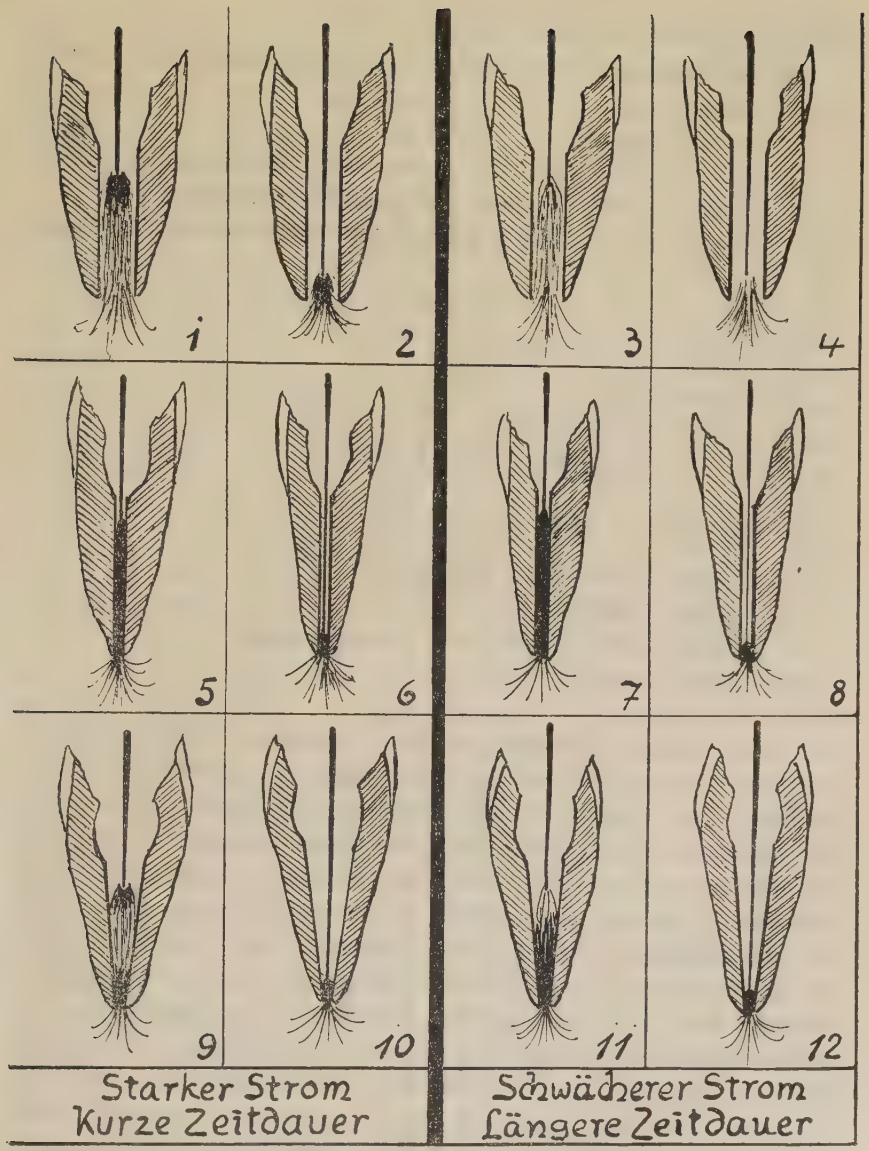
---

7. E. u. W. Flohr, Zahnärztl. Rdsch. 1930, Nr. 7, geben an, daß sie bei Versuchsmessungen an Kiefern toter und lebender Hunde bei gleicher Dosierung Temperatursteigerung an der Wurzelhaut von 12-14° bei toten, von 5-7° bei lebenden Hunden beobachteten.

Man darf annehmen, daß bei Anwendung kurzer starker Stromstöße keine wesentliche Nivellierung der erforderlichen Stromstärke durch Ausgleich und Ableitung der Wärme eintritt, dagegen dürfte dieselbe bei Anwendung schwächerer, längerer Zeit hindurch angewendeter Ströme ganz beträchtlich sein. Als Grenzfall wäre ein Gleichgewichtszustand anzunehmen, bei dem die Wärmeableitung gleich der Wärmezufuhr durch den elektrischen Strom ist („medizinische Diathermie"). Es wäre hier die anzuwendende Stromstärke nicht mehr abhängig von Widerstand und Volumen des Leiters, (da das ganze Gebiet, nicht nur der Kanalinhalt, sondern auch der gesamte Zahn und seine Umgebung, erwärmt wird, die erwärmte Zone bei annähernd gleichen anatomischen Verhältnissen also auch annähernd gleich groß ist), sondern allein von der Güte der Wärmeableitung durch gute Durchblutung etc. Die Gefahr für das periodontale Gewebe ist natürlich im zweiten Falle größer als im ersten.

Zusammenfassend ist also zu sagen: Je größer die Stromstärke ist, und je geringer infolgedessen die Zeitdauer des Stromflusses sein kann, desto geringer ist die Wärmeableitung von dem Ort der primären Entstehung, je geringer dagegen die Stromstärke und je länger daher die Anwendungszeit ist, desto mehr von der entstehenden Wärme wird abgeleitet. Zur Erwärmung eines umschriebenen Gebietes auf eine bestimmte Temperatur muß also infolge des Wärmeverlustes an die Umgebung in letzterem Falle mehr Energie zugeführt werden als in ersterem.

Einen Ueberblick über die Beziehungen zwischen anatomischer Form des Wurzelkanals, Art der Stromgabe und Art der Elektrodenapplikation möge nachstehende Skizze geben.


1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
Starker Strom
Kurze Zeitdauer
Schwächerer Strom
Längere Zeitdauer

Es ergibt sich, daß bei den verschiedenen Kanalformen durchaus verschiedene Wirkungen erzielt werden, im einzelnen:

Weiter Kanal, weites Foramen

1. Koagulation: Nadelspitze, bei sehr starkem Strom ganzer Kanal
2. Koag: Apex
3. Koag: gar nicht, bei genügender Stärke ganzer Kanal, jedoch große Gefahr für periapic. Gewebe
4. Koag: gar nicht, bei genügender Stärke schwach am Apex

Enger Kanal, enges Foramen

5. Koag: ganzer Kanal
6. Koag: Apex
7. Koag: ganzer Kanal
8. Koag: gar nicht oder am Apex

Kegelförmiger Kanal

9. Koag: Nadelspitze und Apex
10. Koag: Apex
11. Koag: Apex (basiswärts Wärmeausgleich)
12. Koag: Apex.

Eine weitere Komplikation der Verhältnisse tritt hinzu dadurch, daß der Leiter nich ein geschlossenes Gebilde darstellt, sondern eine Unzahl von mehr oder weniger starken Nebenzweigen entsendet. Es müssen nämlich in diesem Zusammenhang, als Stromleiter, auch sämtliche Dentinkanälchen mit ihrem Inhalt als Nebenkanäle angesehen werden (cf. Widerstandswerte S und T). Diese Dentinfasern dringen bis dicht unter die Oberfläche vor und verzweigen sich hier. Ob einzelne direkte Faserverbindungen, vielleicht über die Sharpeyschen Fasern bis zur Oberfläche bestehen, oder ob die dünne Hartschicht, — vollständige Nichtleiter gibt es ja nicht — die Weiterleitung übernimmt, soll hier nicht untersucht werden. Jedenfalls muß angenommen werden, daß auch eine Erwärmung der Dentinfasern, und damit des gesamten Zahnbeines eintritt. Da die Bedingungen für eine Wärmeableitung

im Innern des Zahnes nicht sehr günstig sind, dürfte diese Erwärmung nicht unwesentlich sein[8].

Immerhin wird an der Oberfläche des Zahnes von dem durchbluteten periodontalen Gewebe bei normalen Stromdosen der größte Teil der Wärme abgeleitet werden, so daß die für das Periodontium gefährdetsten Stellen im allgemeinen doch wohl die Austrittsstellen der eigentlichen Wurzelkanäle sind.

Die Verteilung des Stromes auf die verschiedenen Leitungsbahnen erfolgt — nach dem Kirchhoffschen Gesetz — umgekehrt proportional ihrem Widerstand. Unter Zugrundelegung der gleichen vereinfachten Verhältnisse wie auf Seite 8, verteilt sich also der Strom bei Verzweigungen von gleicher Länge (bei zylindrischer Form) proportional den Querschnitten. Die Erwärmung (Koagulation, Verkochung) ist daher unter diesen Bedingungen für alle Zweige gleichmäßig und gleichzeitig ohne Rücksicht auf die Dicke der einzelnen Abzweigungen. Aehnliche Verhältnisse können natürlich auch bei mehrkanaligen Zähnen vorliegen, wenn zufällig Widerstand und Volumen der einzelnen Kanäle in einem solchen Verhältnis stehen, daß gleichzeitige und gleichmäßige Erhitzung bei gemeinsamer Stromzuführung zustande kommt. Das wird aber nur seltener Ausnahmefall sein. In der Mehrzahl der Fälle wird sich ein Kanal früher erwärmen als der andere. Es muß also hier, wo — wenigstens oft — die Möglichkeit besteht, die Kanaleingänge voneinander zu isolieren, Einzelbehandlung jedes Kanals gefordert werden. Daß auch hierbei durch Querverbindungen zwischen mehreren Kanälen Schwierigkeiten auftreten können, bedarf keiner Erwähnung. Diese Einzelbehandlung jedes Kanals ist natürlich bei den Verzweigungen im Innern einer Wurzel nicht möglich, so daß in solchen Fällen, besonders wenn sich ein Nebenkanal bereits in größerer Entfernung vom Apex abzweigt, häufig starke Unterschiede in der Erwärmung der einzelnen Leiterabschnitte bestehen werden. Hat z. B. der zylindrische Hauptleiter eine Länge von 4, einen

---

8. cf. Münzesheimer: Die Wurzelbehandlung mit Hochfrequenzstrom: Gelegentlich einer zur Nekrose führenden Ueberhitzung fand M. diese Nekrose nicht nur am Apex, sondern um den ganzen Zahn herum.

Querschnitt von 2, der Nebenzweig eine Länge von 1, einen Querschnitt von 1, so ist

$R_1 = 2$	$R^2 = 1$
$V_1 = 8$	$V^2 = 1$
$J_1 = 1$	$J^2 = 2$
$Qve = {}^1/_4\,!$	$Qve = 4\,!$

Das heißt also (ohne Berücksichtigung ausgleichender Momente): der seitliche Nebenkanal wird 16 mal mehr erhitzt. Falls — wie bisher meist — die Schmerzempfindung des Patienten zum Maßstab genommen wird, wird bei Stromunterbrechung der Hauptkanal nur schwach erwärmt sein; andernfalls wird — bei richtiger Dosierung für den Hauptkanal — bereits Verkochung des periodontalen Gewebes in der Nähe der Austrittsstelle des Nebenkanals eingetreten sein.

Aehnliche Schwierigkeiten können sich auch ergeben durch sehr dünne, arrodierte Wurzeln, durch Verengungen im Kanalverlaufe (Dentikel), durch Querverbindungen zwischen zwei Kanälen usw. Es werden in vielen dieser Fälle starke Unterschiede in der regionären Erwärmung auftreten müssen. Kurze starke Stromstöße begünstigen solche Unterschiede, länger anhaltende schwächere Stromgaben begünstigen mehr den Wärmeausgleich, in extremer Anwendung aber auch über das Kanalgebiet hinaus auf das Periodontalgewebe. Falls nicht bestimmte Zwecke erreicht werden sollen, sind also Extreme in der Dosierung zu vermeiden.

Daß trotz der großen Häufigkeit der Fälle mit erschwerenden Verhältnissen (vgl. Röntgenbilder) ein hoher Prozentsatz guter Resultate mit dem Hochfrequenzverfahren erzielt wird, dürfte vor allem darauf zurückzuführen sein, daß

1. durch Koagulation von eiweißhaltigem Kanalinhalt, die zunächst in den am stärksten erwärmten engen — meist apicalen — Kanalabschnitten auftritt, eine erhebliche Widerstandserhöhung bewirkt wird, die ihrerseits ein Sinken der Stromstärke bedingt, so daß ein gewisser Schutz gegen Ueberdosierung im Verfahren selbst begründet ist,

2. die Hochfrequenzbehandlung durchweg mit der mechanischen Säuberung der Kanäle kombiniert wird, wobei sich beide

Verfahren ergänzen. Die vom Strom nicht so hoch erwärmten weiten Kanalteile sind meist dem Reinigungsinstrument zugänglich, die diesem unzugänglichen engen Kanälchen dagegen werden vom Strom besonders gut erwärmt,

3. durch die Wärmeleitung und Durchmischung die Temperaturen im Innern des Zahnes doch soweit ausgeglichen werden können, daß auch Teile, die erst sekundär erhitzt werden, noch auf genügende Temperatur kommen,

4. bei Verwendung hoch wirksamer Desinfizientien nicht erst bei optimaler Erwärmung, sondern auch schon darunter, starke Desinfektionswirkung vorhanden ist, zumal wohl auch an den Stellen der höchsten Temperaturen Verdampfung bzw. Zersetzung in gasförmige Produkte stattfindet, die sich ihren Weg durch den Kanalinhalt bahnen müssen und so auch an anderen Stellen ihre Desinfektionskraft entfalten.

Die bisherigen Ueberlegungen gingen von der Voraussetzung aus, daß der elektrische Strom die sich ihm darbietenden Leiterbahnen benutzen müsse. Tatsächlich spielt jedoch bei den angewendeten Frequenzen die sogenannte kapazitative Ableitung, die Ableitung über einen Kondensator, eine nicht zu unterschätzende Rolle. Diese kapazitative Leitung wird umso größer sein, je größer der Ohmsche Widerstand des Kanalsystems ist, da hierbei innerhalb des Zahnes, zumeist hauptsächlich in der gewöhnlich engen Apexgegend, ein starkes Spannungsgefälle auftritt, so daß das Periodontium gegenüber dem Kanalinhalt eine wesentliche Potentialdifferenz aufweist. Die isolierende Schicht zwischen den Dentinfasern und dem Periodontium ist dünn, so daß ein recht guter Kondensator vorliegt. Andererseits besteht jedoch, wie bereits ausgeführt, auch eine direkte Leitfähigkeit durch die Zahnwandung hindurch, die die Potentialdifferenz wenigstens zum Teil wieder ausgleicht. Es wird sich also bei dem Stromdurchgang eine Verteilung zwischen rein elektronischer und kapazitativer Leitung einstellen, die in der Hauptsache von der Güte der Leitfähigkeit des Kanalsystems abhängt, und zwar wird der Anteil der kapazitativen Ableitung — wie gesagt — bei Zähnen mit geringem Ohmschen Widerstand gering sein und umgekehrt. Die kapazitative Ableitung bedingt also eine gewisse Nivellierung des Wider-

standes für die angewandten Frequenzen gegenüber den gemessenen Ohmschen Widerständen. Entsprechend wird sich bei Zähnen mit geringem Ohmschen Widerstand die Wärmeentwicklung primär zur Hauptsache auf den Bereich des Kanalsystems beschränken, während bei Zähnen mit hohem Ohmschen Widerstand die Erwärmung sich gleichmäßiger über den ganzen Zahn verteilen wird.

Daher dürfte auch bei geringer Ueberdosierung an Zähnen mit hohem Ohmschen Widerstand das gesamte periodentale Gewebe, bei Zähnen mit geringem Ohmschen Widerstand hauptsächlich das Gewebe in der Gegend der Kanalmündungen in Mitleidenschaft gezogen werden, wobei in letzterem Falle noch die leichtere Wärmeableitung nach außen durch ein verhältnismäßig weites Foramen hinzukommt.

Nach dem bisher zumeist geübten Verfahren benutzt man diese Erwärmung des Periodontiums zur Dosierung des Stromes, indem man den Patienten vor der Behandlung auffordert, bei Verspüren einer Wärmeempfindung ein Zeichen zu geben. Wie bereits erwähnt, muß dieser Augenblick auch immer die maximale und optimale Grenze für die Stromabgabe darstellen, die eben nur dadurch in gewissem Maße beeinflußbar sein dürfte, daß man entweder einen kurzdauernden starken Stromstoß — bezw. deren mehrere — gibt, oder aber einen schwächeren Strom längere Zeit hindurch einwirken läßt. Ob hierbei genauer erfaßbare Regeln aufzustellen sind, muß hier dahingestellt bleiben. Es ist klar, daß das Auftreten dieser Wärmeempfindung außer von anderen Faktoren, auf die hier nicht eingegangen werden soll (Verschiedenartigkeit der Erwärmung im Zahninnern, Indolenz des Patienten usw.), abhängig ist von der Intaktheit des Periodontiums. Ist dieses völlig unbeschädigt, so wird der Patient schon bei geringer Temperaturerhöhung außerhalb des Zahnes die Wärmeempfindung verspüren, ist jedoch die Wurzelspitze von einem Granulationsgewebe umgeben, so wird — in den Fällen, wo die Außenwärme hauptsächlich am Foramen auftritt — die Wärme dieses doch nervenlose Gebilde erst durchdringen müssen, bevor dem Patienten die Erwärmung zum Bewußtsein kommt. Daß hierbei bisweilen — abhängig von der Größe des nicht innervierten Gebietes — sehr große Energiemengen zur Anwen-

dung kommen, zeigt z. B. die Angabe von Münzesheimer[9], daß er bei Vorhandensein von Zysten bis zu 400 mA mehrere Sekunden hindurch hat geben müssen.

Ob und wieweit durch eine am Foramen sehr starke, nach der Peripherie schnell abnehmende Wärmeentwicklung im Granulom eine günstige Heilwirkung hervorgebracht wird, kann an dieser Stelle nicht untersucht werden. Möglicherweise beruht ein Teil der günstigen Diathermieerfolge hierauf.

Zusammenfassung:

Nach kurzen Angaben über die prinzipiellen Grundlagen des Hochfrequenzstromes wird — zur Orientierung — auf seine Wirkungsweise unter vereinfachten „idealen" Bedingungen an Leitern von verschiedener Form hingewiesen. Eine darauf folgende Zusammenstellung der Ergebnisse von Widerstandsmessungen an extrahierten Zähnen sowie Röntgenaufnahmen derselben lassen weitgehende Unterschiede der in Frage kommenden Faktoren erkennen. Die Wirkung des Hochfrequenzstromes zeigt sich als weitgehend abhängig von den vorliegenden anatomischen Verhältnissen, in der Hauptsache von

dem Widerstand und dem Volumen, bezw. der Formgestaltung des Kanalsystems

(angenähert zylindrische Leiter mit verhältnismäßig weitem Foramen,
angenähert kegelförmige Leiter mit verhältnismäßig engem Foramen,
plötzliche Verengungen am Apex oder im Kanalverlauf,
Kanalverzweigungen,
Dentinkanälchen,
Dentinleitung)

daneben von der Wärmeverteilung und -ableitung, in Abhängigkeit von anatomischer Gegebenheit sowie Art der Stromgabe,

und von der anatomisch bedingten Verteilung zwischen direkter und kapazitativer Leitung.

---

9. Münzesheimer: Die Wurzelbehandlung mit Hochfrequenzstrom.

Es ergibt sich, daß die Fülle der in ihrer Auswirkung zu berücksichtigenden, sich vielfach untereinander beeinflußenden Faktoren, die schon im einzelnen schwer zu bestimmen sind, eine meßtechnische Erfassung nicht gestattet. Daß andererseits durch die Faktoren, die im Sinne eines Ausgleiches der erforderlichen Energiemengen wirken, eine derartige Nivellierung — selbst bei geschickter Stromzufuhr — erreicht werden kann, daß optimale Dosierung mit empirisch gefundenen festen Werten zu erzielen ist, muß verneint werden. Die Unterschiede der durch den anatomischen Bau bedingten Faktoren (extrem weite bezw. enge, sowie extrem geformte Kanäle, Extreme in der regionären Entstehung sowie den Ableitungsmöglichkeiten der primär erzeugten Wärme usw.) sind zu groß, als daß sie durch nivellierende Einflüsse ausgeglichen werden könnten.

Es wäre noch daran zu denken, durch direkte Messung der im Zahn entstehenden Wärme, oder durch Ausnutzung einer bei bestimmter Temperatur eintretenden Widerstandsänderung des Kanalinhaltes zu erreichen, daß man die Dosierung objektiv und unabhängig von den Angaben des Patienten vornehmen könnte. Dahinzielende exakte und erfolgreiche Versuche sind bisher nicht bekannt geworden, sie dürften auch wohl infolge der praktischen sowohl wie grundsätzlichen Schwierigkeiten kaum zum Ziele führen.

Zum Schluß sei es mir gestattet, meinem verehrten Lehrer, Herrn Privatdozenten Dr. Fr. Münzesheimer, von dem ich die Anregung zu dieser Arbeit erhalten habe, und der mich jederzeit in freundlichster Weise mit Rat und Anleitung unterstützt hat, meinen verbindlichsten Dank auszusprechen. — Ich möchte es auch nicht unterlassen, der Firma Siemens & Halske A.-G., Berlin, die mir Laboratorium und Meßapparatur zur Verfügung stellte, insbesondere den Herren Dr. Berg und Dr. Ernst, für ihr liebenswürdiges Entgegenkommen bestens zu danken.

Zeichenerklärung

für die im Text vorkommenden Formeln etc.

l = Länge
q = Querschnitt
d = Durchmesser
R = Ohmscher Widerstand
V = Volumen
Q = Wärmemenge
Qve = Wärmemenge pro Volumeneinheit
J = Stromstärke
E = Spannung
t = Zeitdauer
mA = Milliampère
ρ = spezifischer Widerstand

Literatur.

Becker: Zahnärztl. Rundschau, 1929, Nr. 28 u. 34.
Borschke: Ztschr. f. Stomat. 1929.
Feiler, E.: Zahnärztliche Rundschau, 1929, Nr. 46.
Flohr, E.: Zahnärztl. Rundschau, 1929, Nr. 41 u. 42.
Flohr, E. u. W.: Zahnärztl. Rundschau, 1930, Nr. 7.
Klein, W.: Ztschr. f. Stomat., Mai 1929.
Kowarschik: Die Diathermie. 1928, Verl. Springer.
Kristiansen: Vierteljahrsschrift f. Zahnheilkde. 1929, S. 619.
Müller, B. u. Ebbers: Die Diathermie in der Zahnheilkunde, Vortrag geh. am. 2. Nov. 1929 im Verein Berlin-Brandenbg. Zahnärzte.
Münzesheimer: Die Wurzelbehandlung mit Hochfrequenzstrom. — Vergl. Meusser, Berlin. 1931.
Nagelschmidt: Lehrbuch der Diathermie. 1930, Verlag Springer.
Sturm, H.: Ztschr. f. Stomat., Oktober 1927.
Wasgien, K.: Zahnärztl. Rundschau, 1929, Nr. 31., 1930, Nr. 14.

Lebenslauf.

Ich, Johannes Hirchert, wurde am 27. Januar 1891 in Mirow, Mecklbg.-Strelitz, geboren, absolvierte das humanistische Gymnasium Carolinum zu Neustrelitz und studierte nach abgelegtem Abiturientenexamen bis Ausbruch des Krieges in Kiel und München Naturwissenschaften, speziell Chemie.

Am Kriege nahm ich aktiv teil und trat nach meiner Rückkehr infolge veränderter wirtschaftlicher Verhältnisse zum Bankdienst über.

Ostern 1928 begann ich mit dem Studium der Zahnheilkunde, machte Ostern 1929 das Vorexamen und beendete am 30. Januar 1931 das Staatsexamen.